



国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

中国战略性新兴产业——新材料

# 新型合金材料——钛合金

中国材料研究学会组织编写

丛书主编◎黄伯云

编 著◎赵永庆 辛社伟 陈永楠 毛小南 等

中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

中国战略性新兴产业——新材料

# 新型合金材料——钛合金

中国材料研究学会组织编写

丛书主编 黄伯云

丛书副主编 韩雅芳

编 著 赵永庆 辛社伟 陈永楠 毛小南 等

**中国铁道出版社**  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

## 内 容 简 介

“中国战略性新兴产业——新材料”丛书是中国材料研究学会组织编写的，被新闻出版广电总局批准为“十二五”国家重点出版物出版规划项目，并获 2016 年度国家出版基金资助。丛书共 16 分册，涵盖了新型功能材料、高性能结构材料、高性能纤维复合材料等 16 种重点发展的材料。本分册为《新型合金材料——钛合金》。

钛及钛合金因具有优异的综合性能，得到世界各国的高度重视，在各行各业获得了广泛的应用。本书主要论述钛及钛合金工艺、组织与性能，钛合金半固态加工技术，各类典型钛合金的物理性能和力学性能，中国自主研发钛合金的现状与进展，钛合金的应用。

本书可供新材料科研院所、高等院校、新材料产业界、政府相关部门、新材料中介咨询机构等领域的人员参考，也可以作为高等院校相关专业的大学生、研究生的教材或参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

中国战略性新兴产业·新材料·新型合金材料——钛合金/赵永庆等  
编著. —北京:中国铁道出版社, 2017. 8  
ISBN 978-7-113-22967-2

I. ①中… II. ①赵… III. ①新兴产业-产业发展-研究-中国②稀土  
金属-有色金属冶金-产业发展-研究-中国 IV. ①F121. 3②F426. 32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 067369 号

书 名: 中国战略性新兴产业——新材料  
新型合金材料——钛合金  
作 者: 赵永庆 辛社伟 陈永楠 毛小南 等 编著

策 划: 李小军 读者热线: (010) 63550836  
责任编辑: 李小军 许 璐  
封面设计: **MX** DESIGN  
STUDIO  
责任校对: 张玉华  
责任印制: 郭向伟

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市西城区右安门西街 8 号)  
网 址: <http://www.tdpress.com/51eds/>  
印 刷: 中煤(北京)印务有限公司  
版 次: 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷  
开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 14.25 字数: 303 千  
书 号: ISBN 978-7-113-22967-2  
定 价: 68.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书，如有印制质量问题，请与本社教材图书营销部联系调换。电话：(010) 63550836

打击盗版举报电话：(010) 51873659

## “中国战略性新兴产业——新材料”丛书

### 编委会

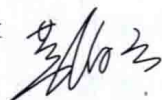
- 主任：**黄伯云（中国工程院院士、中国材料研究学会名誉理事长）
- 副主任：**韩雅芳（教授、中国材料研究学会副理事长兼秘书长）  
田京芬（中国铁道出版社社长、全国新闻出版行业领军人才）
- 编委：**李元元（中国工程院院士、中国材料研究学会理事长）  
魏炳波（中国科学院院士、中国材料研究学会副理事长）  
周玉（中国工程院院士、中国材料研究学会副理事长）  
谢建新（中国工程院院士、中国材料研究学会副理事长）  
郑有焯（中国科学院院士、南京大学教授）  
李卫（中国工程院院士、中国材料研究学会常务理事）  
姚燕（教授、中国材料研究学会副理事长）  
罗宏杰（教授、中国材料研究学会副理事长）  
韩高荣（教授、中国材料研究学会副理事长）  
唐见茂（教授、中国材料研究学会常务理事、咨询专家）  
张新明（教授、俄罗斯工程院院士、俄罗斯宇航科学院院士）  
潘复生（教授、中国材料研究学会常务理事）  
朱美芳（教授、中国材料研究学会常务理事）  
张增志（教授、中国材料研究学会常务理事兼副秘书长）  
武英（教授、中国材料研究学会常务理事兼副秘书长）  
赵永庆（教授、中国材料研究学会理事）  
李贺军（教授、中国材料研究学会理事）  
杨桂生（教授、中国材料研究学会理事）  
吴晓东（清华大学材料学院教授）

水平的科技著作丛书。丛书最大的特点是体现了一个“新”字：介绍和论述了我国材料领域取得的最新研究成果、开发的最先进材料品种和最新制造技术，所著内容代表当代全球新材料发展方向和主流。丛书既具有较高的学术性和技术先进性，同时对我国新材料产业发展也具有重要的参考价值。

中国材料研究学会是全国一级学术团体，具有资源、信息和人才的综合优势，多年来在促进材料科学进步、开展国内外学术交流、承接政府职能转移、提供新材料产业发展决策咨询、开展社会化服务等方面做了大量的、卓有成效的工作，为推动我国新材料发展发挥了重要作用。参加本丛书编著的作者都是我国从事相关材料研究和开发的一流的科研单位和院校、一流的专家学者，拥有数十年的科研、教学和产业开发经验，并取得了国内领先的科研成果，创作态度严谨，从而保障了本套丛书的内容质量。

本丛书的编著和出版是近年来我国材料研究领域具有足够影响的一件大事。我们希望，本丛书的出版能对我国新材料技术和产业发展产生较大的助推作用，也热切希望广大材料科技人员、产业精英、决策机构积极投身到发展我国新材料研发的行列中来，为推动我国新材料产业又好又快的发展做出更大贡献！

中国材料研究学会名誉理事长  
中国工程院院士



2016年6月

## 前 言

“中国战略性新兴产业——新材料”丛书由中国材料研究学会组织编写,被新闻出版广电总局批准为“十二五”国家重点出版物出版规划项目,经国家出版基金管理委员会评审,获2016年度国家出版基金资助。

根据国务院《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》,新材料被列为我国战略性新兴产业之一。本丛书定位为:从战略性新兴产业的高度,着重论述该类新材料在国民经济和国防建设重大工程 and 项目中的地位 and 作用、技术基础、最新研究成果、应用领域及发展前景。其特点在于体现一个“新”字,即在遵守国家有关保密规定的前提下论述当代新材料的最先进的工艺和最重要的性能。它代表当代全球新材料发展主流,对实现可持续发展具有重要的现实意义和深远的指导意义。丛书共16分册,涵盖了新型功能材料、高性能结构材料、高性能纤维复合材料等16种重点发展材料。本分册为《新型合金材料——钛合金》。

自20世纪50年代以来,钛及钛合金因具有优异的综合性能,得到了世界各国的高度重视,在各行各业获得了广泛的应用。尽管如此,钛及钛合金方面的专著很少,尤其是专门论述新型钛合金研究进展、钛合金加工技术、微观组织特征、半固态加工技术和应用的专著更少。本书编著的目的在于为从事钛合金及相关材料专业的工作者提供一本较为系统的有关钛合金研究进展、加工技术、微观组织特征、半固态加工技术和应用等方面知识的著作,内容既具学术性,也兼顾实用性。

本书第1章和第4章由西北有色金属研究院赵永庆教授编著,第2章由西北有色金属研究院辛社伟博士编著,第3章由长安大学陈永楠博士编著,第5章由西北有色金属研究院赵永庆、葛鹏教授编著,第6章由西北有色金属研究院毛小南教授、张鹏省高级工程师、侯智敏高级工程师等编著,全书由赵永庆和辛社伟统稿和校正。

感谢国家创新人才推进计划重点领域“钛合金研制创新团队”的支持!在本书撰写过程中,编者参考了大量文献资料,而各章后面所附参考文献仅为其中部分资料,在此对本书引用的参考文献的作者表示衷心感谢。

限于时间和资料收集等原因,疏漏之处在所难免,欢迎批评指正。

编著者  
2016年10月

# 目 录

第 1 章 钛及钛合金概述 .....	1
1.1 钛的基本性能 .....	1
1.1.1 钛的原子构造及晶体结构 .....	1
1.1.2 钛的电性能 .....	1
1.1.3 钛的热性能 .....	2
1.1.4 钛的化学及腐蚀性能 .....	2
1.1.5 钛的力学性能 .....	2
1.2 常用钛及钛合金的分类、牌号、特点 .....	3
1.2.1 钛的合金元素 .....	8
1.2.2 钛合金的分类 .....	10
1.3 钛及钛合金的生产及工艺流程 .....	15
1.4 钛及钛合金的应用 .....	17
参考文献 .....	18
第 2 章 钛合金工艺、组织与性能 .....	20
2.1 钛合金组织结构 .....	20
2.1.1 钛合金组织的理解 .....	20
2.1.2 钛合金的组织形态 .....	22
2.1.3 钛合金中的相 .....	23
2.2 热加工过程中的组织演化 .....	24
2.2.1 钛合金锻造的一般过程 .....	24
2.2.2 $\beta$ 锻造 .....	26
2.2.3 两相区锻造 .....	31
2.3 热处理过程中的组织演化 .....	34
2.3.1 热处理过程中的相变 .....	35
2.3.2 钛合金中不同相的区别与联系 .....	39
2.3.3 钛合金常见的显微组织结构检测方法 .....	44
2.3.4 钛合金热处理的归类 .....	50

2.4.1	不同显微组织结构对合金力学性能的影响 .....	56
2.4.2	钛合金显微组织结构的设计 .....	58
	参考文献 .....	60
<b>第3章</b>	<b>钛合金半固态加工技术 .....</b>	<b>62</b>
3.1	Ti-xCu 合金不同条件下的流变行为及组织特征 .....	62
3.1.1	Ti-2.5Cu 合金在不同条件下的流变行为及组织特征 .....	63
3.1.2	Ti-7Cu 合金在不同条件下的流变行为及组织特征 .....	67
3.1.3	Ti-14Cu 合金在不同条件下的流变行为及组织演变特征 .....	72
3.1.4	Cu 含量对 Ti-xCu 合金半固态流变行为的影响 .....	77
3.1.5	半固态变形过程中的宏观偏析行为 .....	81
3.1.6	Ti-xCu 合金半固态合金变形机理 .....	85
3.2	Ti-xCu 合金半固态锻造行为及力学性能 .....	89
3.2.1	Ti-xCu 合金可锻性研究 .....	90
3.2.2	Ti-xCu 合金半固态锻造中的微观组织演变特征 .....	92
3.2.3	Cu 含量对 Ti-xCu 合金半固态组织演变的影响 .....	98
3.2.4	Ti-xCu 合金锻件力学性能研究 .....	102
	参考文献 .....	112
<b>第4章</b>	<b>各类典型钛合金介绍 .....</b>	<b>115</b>
4.1	$\alpha$ 及近 $\alpha$ 型钛合金 .....	115
4.1.1	TA7 钛合金 .....	115
4.1.2	TA11 钛合金 .....	117
4.1.3	TA12 钛合金 .....	119
4.1.4	TA19 钛合金 .....	121
4.1.5	TA15 钛合金 .....	122
4.1.6	Ti53311S 钛合金 .....	124
4.1.7	Ti75 钛合金 .....	125
4.1.8	Ti31 钛合金 .....	126
4.1.9	Ti80 合金 .....	128
4.1.10	TA16 钛合金 .....	129
4.1.11	TA18 钛合金 .....	130
4.2	$\alpha$ - $\beta$ 型钛合金 .....	132
4.2.1	TC4 钛合金 .....	132
4.2.2	TC6 钛合金 .....	137
4.2.3	TC11 钛合金 .....	138
4.2.4	TC16 钛合金 .....	140



4.2.5	TC17 钛合金 .....	142
4.2.6	TC21 钛合金 .....	144
4.2.7	TC18 钛合金 .....	145
4.2.8	TC19 钛合金 .....	146
4.3	$\beta$ 型钛合金 .....	147
4.3.1	TB2 钛合金 .....	147
4.3.2	TB6 钛合金 .....	148
4.3.3	TB8 钛合金 .....	150
4.3.4	TB7 钛合金 .....	152
	参考文献 .....	154
<b>第 5 章</b>	<b>中国自主研发钛合金现状与进展 .....</b>	<b>155</b>
5.1	高强及损伤容限钛合金 .....	155
5.1.1	损伤容限钛合金 .....	155
5.1.2	超高强钛合金 Ti1300 .....	156
5.1.3	超高强新型钛合金成分定量设计 .....	158
5.2	高温钛合金 .....	158
5.2.1	Ti60 钛合金 .....	159
5.2.2	Ti600 钛合金 .....	160
5.3	阻燃钛合金 .....	160
5.4	低温钛合金 .....	161
5.5	船用钛合金 .....	162
5.5.1	Ti91 钛合金 .....	162
5.5.2	Ti-B19 钛合金 .....	163
5.6	耐蚀钛合金 .....	163
5.7	医用钛合金 .....	164
5.8	低成本钛合金 .....	165
5.8.1	Ti12LC 钛合金 .....	165
5.8.2	Ti5322 钛合金 .....	165
5.9	钛合金的发展趋势 .....	166
	参考文献 .....	166
<b>第 6 章</b>	<b>钛合金的应用 .....</b>	<b>169</b>
6.1	钛在航空领域的应用 .....	169
6.1.1	航空领域的用钛量 .....	169
6.1.2	钛在航空飞机中的典型应用 .....	174
6.1.3	常用的航空用钛合金类型 .....	180

6.2 钛合金在航天领域中的应用 .....	187
6.2.1 运载火箭 .....	188
6.2.2 卫星 .....	190
6.2.3 载人宇宙飞船 .....	191
6.3 钛合金在航海领域的应用 .....	193
6.3.1 舰船制造 .....	193
6.3.2 海洋工程 .....	196
6.4 钛合金在化工领域的应用 .....	198
6.4.1 氯碱工业 .....	200
6.4.2 纯碱制造工业 .....	201
6.4.3 有机化肥制备 .....	202
6.5 钛合金在武器装备领域的应用 .....	203
6.5.1 多种类型炮及导弹 .....	203
6.5.2 装甲、头盔和防弹衣 .....	205
6.5.3 其他 .....	206
6.6 钛在其他领域中的应用 .....	206
6.6.1 汽车工业 .....	206
6.6.2 钛生活用品 .....	207
6.6.3 医用钛合金 .....	210
6.6.4 钛在建筑行业的应用 .....	211
参考文献 .....	213

# 第1章 钛及钛合金概述

钛是20世纪50年代初走向工业化生产的一种重要金属。钛性质优良,储量丰富,其重要性仅次于铁、铝,被誉为正在崛起的“第三金属”。钛具有许多重要的特性,如密度小、比强度高、耐腐蚀、膨胀系数低、导热率低、无磁性、生理相容性好、表面可磁性强,还具有储氢、超导、形状记忆、超弹和高阻尼等特殊功能。它既是优质的轻型耐腐蚀结构材料,又是新型的功能材料以及重要的生物医用材料。在众多特性中,钛有两个最为显著的优点:比强度高和耐腐蚀性好,从而使它在空中、陆地、海洋和外层空间都有广泛的用途,包括航空航天、常规兵器、舰艇及海洋工程、核电及火力发电、化工与石油化工、冶金、建筑、交通、体育与生活用品等方面。与钢铁及铝合金等量大面广的金属材料相比,钛及钛合金虽然具有很多性能优势,但其生产和应用的规模及发展依然存在一定的限制因素,最主要的是成本偏高。钛及钛合金的扩大生产和应用尚有待于进一步的发展和努力。

## 1.1 钛的基本性能

### 1.1.1 钛的原子构造及晶体结构

钛在元素周期表中位于第IVB族第四长周期中,原子序数为22。钛原子的22个外层电子在各电子层的分布为: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^2 4s^2$ ,其特点是d电子层不充满,属于过渡金属。钛的相对原子质量是47.867,其主要的同位素相对原子质量有46、47、48、49、50,其相对原子质量为48的同位素在自然界中的相对含量最高,达到73.45%。纯钛的熔点为 $1640\sim 1670\text{ }^\circ\text{C}$ 。钛有两种同素异晶体即 $\alpha$ 相和 $\beta$ 相,其同素异晶体转变温度为 $882.5\text{ }^\circ\text{C}$ ;转变温度以下为密排六方结构(hcp)的 $\alpha$ 相,而在 $882.5\text{ }^\circ\text{C}$ 以上为体心立方结构(bcc)的 $\beta$ 相。 $\alpha$ -Ti在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时的点阵常数为 $a=2.9503\times 10^{-10}\text{ m}$ , $c=4.6831\times 10^{-10}\text{ m}$ , $c/a=1.5873$ ; $\beta$ -Ti在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时的点阵常数为 $a=3.2320\times 10^{-10}\text{ m}$ 。纯钛的密度为 $4.50\text{ g/cm}^3$ 。

### 1.1.2 钛的电性能

钛的过渡金属原子构造决定了它具有高电阻。由于氧、氮、碳、铁等杂质对钛的电阻影响很大,所以钛的电阻测定分散性较大。纯度最高的碘化钛的电阻率 $\rho=0.45\text{ }\mu\Omega\cdot\text{m}$ ,随温度增高比电阻增加。当发生 $\alpha\rightarrow\beta$ 转变时,比电阻下降, $\beta$ -Ti的平均电阻率为 $\rho=0.16\text{ }\mu\Omega\cdot\text{m}$ 。许多研究表明,当温度接近绝对零度时,钛具有超导性,但因冷作硬化和微量杂质的影响很

大,故纯钛的超导物理数据的分散性较大。

### 1.1.3 钛的热性能

钛和钛合金的线膨胀系数和比热容比较低,其导热率大约只是铝及铝合金导热率的1/15,是钢的1/5。

### 1.1.4 钛的化学及腐蚀性能

钛具有很高的化学活性,并且其化学活性随温度升高而急剧增强。钛的活性表面在室温就开始吸氢,在300℃时吸氢量加大;钛与氧开始明显发生作用的温度是600℃;而与氮发生作用的温度则高于700℃。通过真空退火,几乎可以完全除去氢,而氧、氮则不可能除去。钛在空气介质中加热时,会在表面生成一种薄、致密而且稳定的氧化膜,它具有保护作用。钛在500℃以下的空气中是稳定的,在800℃以上时,氧化膜分解,氧原子会进入晶格从而使金属变脆。熔融状态的钛与已知的所有耐火材料都能发生剧烈反应。钛剧烈氧化能发生燃烧,干钛粉的自燃温度为300~600℃。粉状、海绵状、尘状、细屑状钛很容易由于火星或一个小火苗而引起燃烧。

钛及其合金对大部分化学介质具有突出的耐腐蚀性能。但四种无机酸(氢氟酸、盐酸、硫酸和磷酸)和另外四种热浓有机酸(草酸、甲酸、二氟乙酸和三氟乙酸)以及腐蚀性极强的氯化铝,对钛及钛合金都有严重的腐蚀作用。钛对一些无水化学试剂(如甲醇和四氯化碳)的腐蚀也很敏感。在高温下,钛及其合金对干燥的氯化钠的应力腐蚀也是敏感的。

在与大多数金属构成的原电池系统中,钛及其合金的电位是属于高价的正电位,从而使其他金属与其接触时被腐蚀,钛的电位仅低于镍基合金,有良好的抗电化学腐蚀性能。

对钛及其合金来说,氢脆是一个重要问题。钛容易从酸洗液、腐蚀液和热加工的高温气氛中吸氢。钛及其合金的氢脆可以表现为以下两种:对工业纯钛和 $\alpha$ 合金,氢脆表现为塑性降低,而强度稍有增加,同时在低于93℃时合金冲击韧性降低;另一种形式则类似于钢的脆化,在恒载荷或持续载荷下,进行慢速拉伸试验时出现的一种脆化现象。

### 1.1.5 钛的力学性能

钛中的杂质含量对钛的力学性能影响很大,杂质含量增多,可以提高其强度而降低塑性。氧、碳、氮是钛中经常存在的杂质,它们能提高钛的强度而降低其塑性,其中氮的影响最大,碳最小,而氧居中。

氢对钛的力学性能的影响主要体现在氢脆上。在钛中,氢的含量达到一定数值后,将大大提高钛对缺口的敏感性,从而急剧降低缺口试样的冲击韧性等性能。一般认为,钛中氢的质量分数应低于0.007%~0.008%,而不允许高于0.0125%~0.015%,因为高于这个含量,在组织上将析出氢化物,并出现明显的氢脆现象。

除氧、碳、氮外,对提高钛的强度影响较大的元素是硼、铍和铝。其他元素对钛的强度影

响不那么强烈,影响程度依次排列为铬、钴、铈、锰、铁、钒和锡。

## 1.2 常用钛及钛合金的分类、牌号、特点

工业纯钛指几种具有不同的铁、碳、氮、氧等杂质含量的非合金钛。它不能进行热处理强化。其成形性能优异,并且易于熔焊和钎焊。它主要用于制造各种非承力件,长期工作温度可达 300℃。半成品有厚板、薄板、棒材、丝材、管材、锻件和铸件。

一般将钛合金划分为  $\alpha$  型、 $\alpha+\beta$  型、 $\beta$  型钛合金。近 50 年来,随着钛合金研究与应用的迅速发展,特别是热处理强化的钛合金,经常遇到的是非平衡状态的组织,因此按照亚稳定状态的相组成进行钛合金的分类更为可取。根据钛合金从  $\beta$  相区淬火后的相组成与  $\beta$  稳定元素含量关系的示意图,如图 1-1 所示。钛合金划分为以下六种类型,各类钛合金的主要特征如图 1-2 所示。

- (1)  $\alpha$  型钛合金:包括工业纯钛和只含  $\alpha$  稳定元素的合金;
- (2) 近  $\alpha$  型钛合金: $\beta$  稳定元素含量小于  $C_1$  的合金;
- (3) 马氏体  $\alpha+\beta$  型钛合金: $\beta$  稳定元素含量从  $C_1$  到  $C_k$  的合金,这类合金可以简称为  $\alpha+\beta$  型钛合金;
- (4) 近亚稳定  $\beta$  型钛合金: $\beta$  稳定元素含量从  $C_k$  到  $C_3$  的合金,这类合金可以简称为近  $\beta$  型钛合金;
- (5) 亚稳定  $\beta$  型钛合金: $\beta$  稳定元素含量从  $C_3$  到  $C_\beta$  的合金,这类合金可以简称为  $\beta$  型钛合金;
- (6) 稳定  $\beta$  型钛合金: $\beta$  稳定元素含量超过  $C_\beta$  的合金,这类合金可以简称为全  $\beta$  型钛合金。

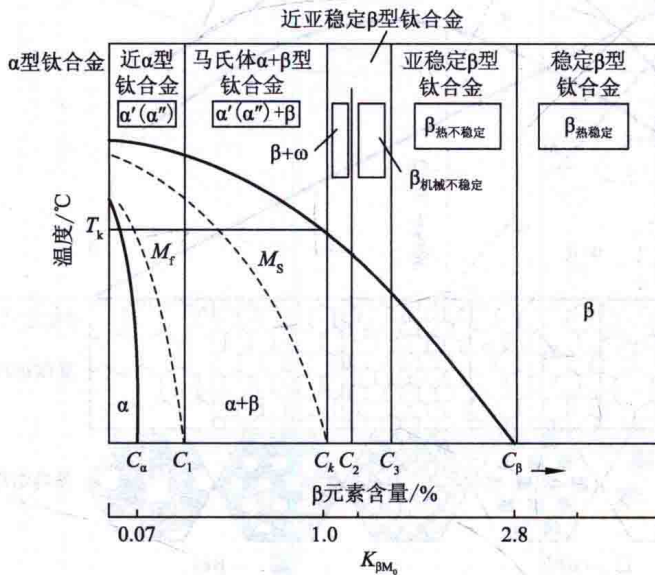


图 1-1 钛合金从  $\beta$  相区淬火后的相组成与  $\beta$  稳定元素含量关系的示意图

注:  $K_{\beta M_0}$  —  $\beta$  相条件系数。

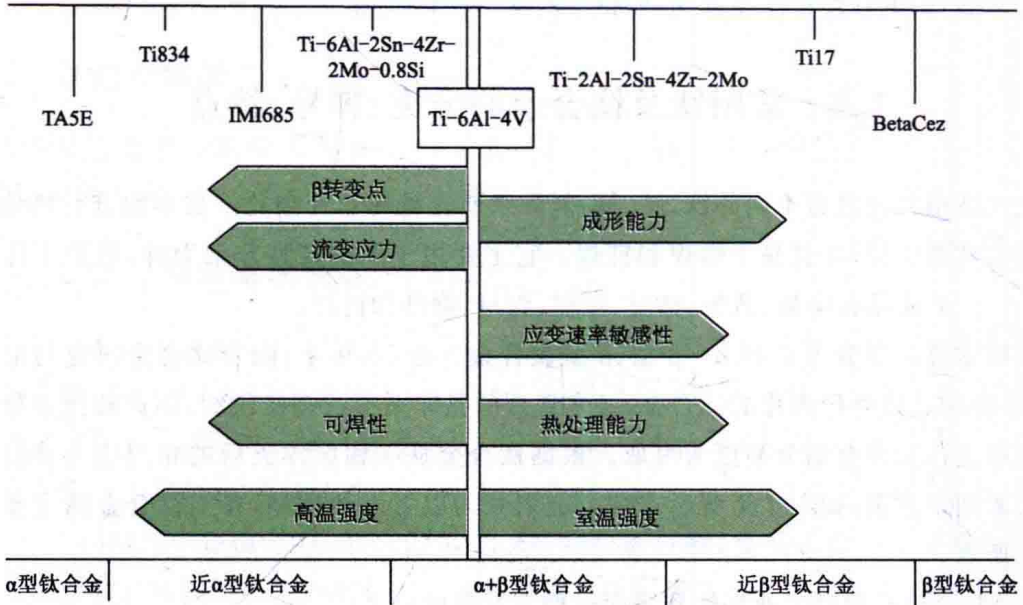


图 1-2 各类钛合金的主要特征

图 1-3 所示为整个相图中总体上各合金的抗拉强度分布水平(退火状态和固溶时效状态)和显微组织的变化规律。在  $C_{kp}$  附近的合金具有最细、最均匀的显微组织和最高的强度等级。成分和显微组织对钛合金的性能起着决定性的作用。对钛合金的成分-组织-性能的研究中已经逐步从定性分析转变为定量研究。

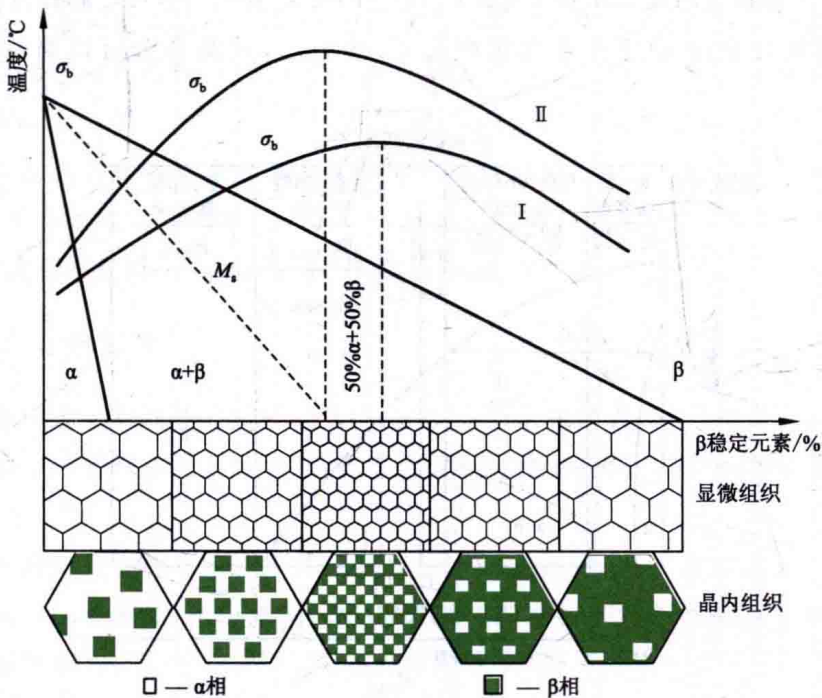


图 1-3 钛合金  $\beta$  稳定元素含量与组织、性能的关系  
I—退火状态；II—固溶时效状态

常用钛合金的牌号、名义化学成分、工作温度、抗拉强度、特点与应用分别见表 1-1、表 1-2 和表 1-3。

表 1-1 工业纯钛、 $\alpha$  和近  $\alpha$  型钛合金

序号	合金类型	中国牌号	国外相近牌号	名义化学成分	工作温度/ °C	抗拉强度/ MPa	特点与应用
1	工业纯钛	TA0	Gr. 1 BT1-00(俄)	Ti	300	$\geq 280$	工业纯钛系指几种具有不同的 Fe、C、N、O 等杂质含量的非合金钛。不能进行热处理强化,成形性能优异,易于熔焊和钎焊。用于制造各种非承力件,可在 300 °C 下长期工作
		TA1	Gr. 2 BT1-0(俄)	Ti	300	$\geq 370$	
		TA2	Gr. 3	Ti	300	$\geq 440$	
		TA3	Gr. 4	Ti	300	$\geq 540$	
2	$\alpha$	TA5	48-OT3	Ti-4Al-0.005B	—	$\geq 680$	具有优良的焊接性能和耐腐蚀性,制造海洋环境下使用的结构件
3	$\alpha$	TA7 (TA7ELI)	Gr. 6 BT5-1(俄)	Ti-5Al-2.5Sn	500	$\geq 785$	中强 $\alpha$ 钛合金,不能热处理强化。室温和高温下具有良好的断裂韧性。焊接性能良好,可制造机匣壳体、壁板等零件。可在 500 °C 下长期工作
4	$\alpha$	TA9	Gr. 7	Ti-0.2Pd	350	$\geq 370$	少量钯的加入改善了在氧化性介质中的耐蚀性,特别是抗缝隙腐蚀能力,可在化工和防腐工程中应用
5	近 $\alpha$	TA16	ИТ-7М(俄)	Ti-2Al-2.5Zr	350	$\geq 470$	低强度、高塑性、耐腐蚀性能和焊接性能好的管材合金
6	近 $\alpha$	TA10	Gr. 12(美)	Ti-0.3Mo-0.8Ni	—	$\geq 485$	耐蚀性能显著优于纯钛而接近 TA9
7	近 $\alpha$	TA11	Ti-811	Ti-8Al-1Mo-1V	500	$\geq 895$	属于近 $\alpha$ 型钛合金,具有较高弹性模量和较低的密度。室温强度与 TC4 相当,但高温性能高于 TC4。适于制造发动机压气机盘、叶片和机匣等零件
8	近 $\alpha$	TA12	Ti-55(国内)	Ti-5.5Al-4Sn-2Zr-1Mo-0.25Si-1Nd	550	$\geq 980$	属近 $\alpha$ 型热强钛合金,可在 550 °C 下长期工作,具有良好的工艺塑性,适于制造航空发动机压气盘、鼓筒和叶片等零件
9	近 $\alpha$	TA18	Gr. 9(美)	Ti-3Al-2.5V	320	$\geq 620$	属近 $\alpha$ 型钛合金,主要用于可冷加工管材,其焊接性能和冷成形优于 TC4 合金。该合金无缝管用于承压的航空液压和燃油等管路系统
10	近 $\alpha$	TA19	Ti-6242S(美)	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si	500	$\geq 930$	可在 500 °C 下长期工作的近 $\alpha$ 型钛合金,高温强度和蠕变性能优于 TA11 合金。适于制造航空发动机的压气机匣和飞机蒙皮等
11	近 $\alpha$	TA21	OT4-0(俄)	Ti-1Al-1Mn	300	$\geq 490$	低强度、高塑性,耐腐蚀性能和焊接性能好,主要用作管材和钣金零件

续表

序号	合金类型	中国牌号	国外相近牌号	名义化学成分	工作温度/ ℃	抗拉强度/ MPa	特点与应用
12	近 $\alpha$	TC1	OT4-1(俄)	Ti-2Al-1.5Mn	350	$\geq 590$	主要性能特点是比纯钛略高的使用强度和很好的工艺塑性,兼具良好的焊接性能和热稳定性。不能采用固溶时效强化,可在 350℃ 下长期工作,适于制造形状复杂的航空钣金件
13	近 $\alpha$	TC2	OT4(俄)	Ti-4Al-1.5Mn	350	$\geq 685$	属于中强近 $\alpha$ 型钛合金,不能热处理强化。具有良好的冲击焊接性能,可在 350℃ 下长期工作,适于制造航空钣金件
14	近 $\alpha$	TA15 (TA15-1 TA15-2)	BT-20(俄) (BT20-1CB BT20-2CB)	Ti-6.5Al-2Zr- 1Mo-1V	500	$\geq 930$	属于高铝当量的近 $\alpha$ 型钛合金,既具有 $\alpha$ 型钛合金的良好热强性和可焊性,又具有近似 $\alpha+\beta$ 型钛合金的工艺塑性。TA15 具有中强、良好的热稳定性和焊接性能。适于制造在 500℃ 长期工作的航空零件
15	近 $\alpha$	TC20		Ti-6Al-7Nb	550	$\geq 980$	本合金用无毒元素 Nb 取代 TC4 合金中的有毒元素 V。其主要力学性能与 TC4 相当。是一种外科植入物医用钛合金,由瑞士 Sulzer 公司于 1985 年研究开发成功,迄今用量已超过 200 t。目前在国内已有临床应用,并符合 ISO-5832-11—2014 标准
16	近 $\alpha$	Ti-31		Ti-3Al-0.8Mo- 0.8Zr-0.8Ni		640	属中强可焊接近 $\alpha$ 型钛合金耐高温海水腐蚀,适于制造舰船管路系统零件
17	近 $\alpha$	Ti-75		Ti-3Al-2Mo-2Zr		730	属中强可焊近 $\alpha$ 型钛合金,耐海水腐蚀,适于制造热交换器管板类零件
18	近 $\alpha$	Ti-55311S		Ti-5Al-3Sn-3Zr- 1Nb-1Mo-0.3Si	550	980	属近 $\alpha$ 型热强钛合金,可在 550℃ 下长期工作,适于制造各类航空发动机高温零部件

表 1-2  $\alpha+\beta$  型钛合金

序号	合金类型	中国牌号	国外相近牌号	名义化学成分	工作温度/ ℃	抗拉强度/ MPa	特点与应用
1	$\alpha+\beta$	TC4 (TC4ELI)	Gr. 5 BT-6(俄)	Ti-6Al-4V	400	$\geq 895$	属中强 $\alpha+\beta$ 型钛合金,具有优良的综合性能,热加工工艺性能好,在航空航天工业中获得了广泛的应用。可在 400℃ 下长期工作。适于制造航空发动机的风扇和压气机盘和叶片以及飞机的框和接头等零件
2	$\alpha+\beta$	TC6	BT3-1(俄)	Ti-6Al-2.5Mo- 1.5Cr-0.5Fe- 0.3Si	450	$\geq 980$	属马氏体 $\alpha+\beta$ 型钛合金,可在 450℃ 下长期工作,具有良好的热强性能,兼具优良的热加工性能。适于制造航空发动机压气机盘和叶片以及飞机的高推、接头等承力件



续表

序号	合金类型	中国牌号	国外相近牌号	名义化学成分	工作温度/ ℃	抗拉强度/ MPa	特点与应用
3	$\alpha+\beta$	TC11	BT9(俄)	Ti-6.5Al-1.5Zr-3.5Mo-0.3Si	500	$\geq 1030$	属 $\alpha+\beta$ 型热强钛合金,可在500℃下长期工作,具有优异的热强性能并具有较高的室温强度和良好的热加工工艺性能。适于制造航空发动机压气机盘和叶片等零件
4	$\alpha+\beta$	TC16	BT16(俄)	Ti-3Al-5Mo-4.5V	350	$\geq 1030$	属马氏体 $\alpha+\beta$ 型钛合金,准高强钛合金,固溶时效后强度可达1030MPa以上,且应力集中敏感性小,适于制造紧固件
5	$\alpha+\beta$	TC17	Ti-17(美)	Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	430	$\geq 1120$	属富 $\beta$ 稳定元素的 $\alpha+\beta$ 型高强钛合金。具有高强、断裂韧性好、淬透性高和锻造温度宽等优点。适于制造航空发动机风扇和压气机盘等大截面锻件,并能在490℃下长期工作
6	$\alpha+\beta$	TC18	BT22(俄)	Ti-5Al-4.75Mo-4.75V-1Cr-1Fe	400	$\geq 1080$ (退火)	退火状态有高的强度,淬火状态有高的淬透性(250mm),适宜制造承力构件和起落架零件
7	$\alpha+\beta$	TC19	Ti-6246(美)	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	400	1170	适合于中等温度、高强度的发动机压气机盘、风扇盘和叶片等重要构件
8	$\alpha+\beta$	TC451	KARA-5(美)	Ti-4.5Al-5Mo-2Cr-2Zr-0.2Si		$\geq 850$	热处理性能好,相同强度下其塑性和韧性优于Ti-6Al-4V。冷热成形性、焊接性能良好
9	$\alpha+\beta$	TC21				$\geq 1100$	属于高强韧性损伤容限型钛合金,用于航空重要承载构件
10	$\alpha+\beta$	ZTC3		Ti-5Al-2Sn-5Mo-0.3Si-0.02Ce	500	$\geq 930$	一种有共析元素Si和稀土元素Ce的铸造钛合金,在500℃以下具有优良的热强性能,铸造性能好,无热裂化倾向,可用于制造航空发动机机匣、叶轮、支架等铸件
11	$\alpha+\beta$	ZTC4	Ti-6Al-4V(美) BT6JI(俄)	Ti-6Al-4V	350	$\geq 835$	属中强铸造钛合金,可在350℃下长期工作,是国内外应用最广的铸钛合金,可用于制造机匣、壳体、支架、框架等静止航空构件,也可用于制造转速不高的叶轮等构件
12	$\alpha+\beta$	ZTC5	BT26JI(俄)	Ti-5.5Al-1.5Sn-3.5Zr-3Mo-1.5V-1Cu-0.8Fe	500	$\geq 930$	属耐热马氏体 $\alpha+\beta$ 型铸造钛合金。常温下具有高的强韧性匹配和良好的热稳定性。铸造工艺性能好,无裂化倾向。可用于制造各种航空航天静止高强构件